

Авторами разработан способ оперативного определения численности тионовых бактерий в бетоне, который сокращает традиционный микробиологический анализ с 7 дней до нескольких минут. Полученные зависимости позволяют без взятия пробы бетона количественно оценить не только степень агрессивности среды на своде, но и скорость его коррозии, а, следовательно, эксплуатационную надежность объектов водоотведения. Способ может быть использован как для обследования сетей водоотведения, так и при создании системы мониторинга этих объектов.

В целом, разработанные мероприятия можно рассматривать как первый шаг к созданию системы управления хемосинтезом в промышленных водохозяйственных сооружениях.

1. Хемосинтез: К 100-летию открытия С.Н.Виноградским. – М.: Наука, 1989. – 256 с.
2. Кондратьева Е. Н. Литотрофные прокариоты. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 312 с.
3. Заварзин Г. А. Литотрофные микроорганизмы. – М.: Наука, 1972. – 323 с.
4. Биотехнология металлов: Практическое руководство. – М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1989. – 374 с.
5. Андреев Е. И., Билай В. И., Коваль Э. З., Козлова И. А. и др. Микробная коррозия и ее возбудители. – К.: Наук. думка, 1980. – 287 с.
6. Биоповреждения / Под ред. В. Д. Ильичева. – М.: Высшая школа, 1987. – 426 с.
7. Биоповреждение, обрастание и защита от него. – М.: Наука, 1996. – 143 с.
8. Дрозд Г. Я. Повышение эксплуатационной долговечности и экологической безопасности канализационных сетей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Магсеевка, 1998. – 36 с.
9. Hormann K., Hormann F.-J., Schmidt M. Stability of concrete against biogenic sulfuric acid corrosion - a new method for determination // Proceedings of the 10th International Congress on the chemistry of cement. Gothenburg, Sweden, June 2-6, 1997. - Vol. 4. - P.38-42.
10. Яковлев С.В., Корюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
11. McGuire M.J., Lieu N.I., Pearthree M.S. Using chlorate ion to control nitrification // J.Amer. Water Works Ass. – 1999. – 12. P.52-61.

Получено 23.09.2002

УДК 628.543

С.И.МОВЧАН, Н.В.МОРОЗОВ, канд. физ.-матем. наук

Таврическая государственная агротехническая академия, г.Мелитополь

ЛАЗЕРНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ В СТОЧНЫХ ВОДАХ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматриваются методы лазерной доплеровской интерферометрии для определения скорости, эффективного диаметра и величины электрокинетического потенциала частиц примесей тяжелых металлов (ионов хрома) в сточных водах гальванического

производства. На основе анализа зависимости амплитуды доплеровского сигнала методом компьютерного моделирования разработан способ одновременного измерения скорости и эффективного диаметра частиц примесей при электрофорезе.

При исследовании эффективности способов очистки сточных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов (в первую очередь ионов хрома Cr^{+6} и Cr^{+3}), разработке технологического оборудования очистных установок и контроля качества воды важную роль играют экспериментальные оптические методы измерения параметров частиц примесей: электрофоретической скорости, эффективного диаметра, концентрации, величины электрокинетического потенциала (ξ -потенциала) двойного электрического слоя частиц.

Для изучения дисперсных частиц, диаметр которых $D > 0,2$ мкм, используются методы оптической микроскопии [1]. Для исследования коллоидных частиц, размеры которых меньше длины волны освещающего пучка, применяется ультрамикроскопия [2]. Однако эти методы обладают рядом недостатков и ограничений: невысокая точность измерений, невозможность одновременного определения наряду со скоростью частицы величины ее эффективного диаметра, а также трудности в автоматизации процесса измерения. Наиболее перспективными методами измерений параметров коллоидных и дисперсных частиц в водных растворах являются, по-видимому, методы доплеровской лазерной анемометрии, которые позволяют с высокой точностью в реальном времени определять величину и направление скорости частиц, автоматизировать процесс измерения и обработки экспериментальных данных [3-8]. Принцип действия лазерных доплеровских измерителей скорости основан на использовании эффекта Доплера – смещении частоты рассеянного движущейся частицей излучения. При прохождении частицы через исследуемый объем, образованный пересечением двух лазерных пучков, возникает последовательность сигналов рассеяния, так называемых «вспышек» Доплера. Частота этого доплеровского сигнала пропорциональна скорости частицы.

В данной работе рассмотрен лазерный доплеровский метод, который позволяет в реальном времени измерять скорость и эффективный диаметр частиц примесей при электрофорезе в водных растворах. Дифференциальная оптическая схема доплеровского интерферометра, которая использовалась при измерениях, представлена на рис.1.

Излучение гелий-неонового лазера ЛГН-222 с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм с помощью зеркал 1, 2 и светоделителя 3 разделяется на два параллельных когерентных пучка и направляется на длиннофокусную линзу 4. Линзой 4 эти два лазерных пучка фокусируются в фо-

кальной плоскости под углом α друг к другу, где и устанавливается измерительная электрофоретическая ячейка (ИЭЯ) с исследуемым раствором. Угол α между двумя зондирующими пучками можно варьировать, изменяя расстояние H между пучками:

$$\operatorname{tg} \alpha / 2 = H / F, \quad (1)$$

где F – фокусное расстояние линзы 4.

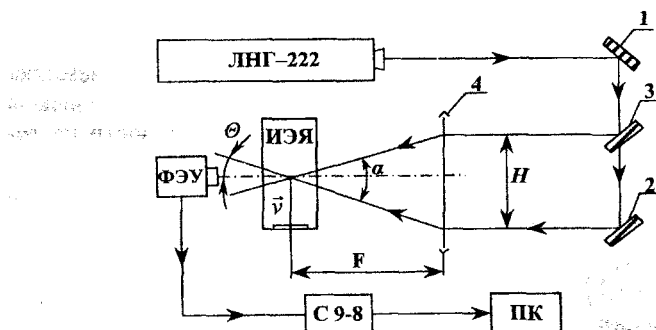


Рис. 1 – Схема лазерной доплеровской измерительной установки для определения электрофоретической скорости, эффективного диаметра и величины электрокинетического потенциала при электрофорезе

В пространстве регистрации фотоприемника (ФЭУ-84-5) происходит интерференция двух когерентных волн, которые рассеиваются движущейся частицей. Доплеровский сигнал с фотоэлектронного умножителя подается на цифровой запоминающий осциллограф (С 9-8).

Частица примеси, имеющая электрокинетический дзета-потенциал, движется под действием силы Кулона в электрическом поле, напряженность которого E :

$$\vec{F}_k = Q \vec{E} = 2 \cdot \pi \epsilon \epsilon_0 \cdot D \cdot \xi \cdot \vec{E}, \quad (2)$$

где D – диаметр сферической частицы.

При равномерном установившемся движении на частицу действует сила вязкости (сила Стокса), которая пропорциональна ее скорости \vec{V}_2 :

$$F_c = -3 \cdot \pi \cdot D \cdot \eta \cdot \vec{V}_2, \quad (3)$$

где \vec{V}_2 – электрофоретическая скорость; η – коэффициент динамической вязкости воды, $\eta = 10^{-3}$ Па с.

Тогда величина электрофоретической скорости \vec{V}_2 определяется по формуле Смолуховского [2, 9]:

$$\vec{V}_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot \xi}{\eta} \quad (4)$$

Для теоретического обоснования параметров разработанной лазерной доплеровской измерительной установки и алгоритма автоматизации процесса измерения скорости и размеров частиц рассмотрим зависимость амплитуды электрического сигнала с фотоприемника (ФЭУ) интерферометра от времени. Величина электрического сигнала (сила фототока, напряжение) пропорциональна интенсивности световой волны в пространстве регистрации, которая образуется в результате интерференции двух когерентных волн, рассеянных движущейся частицей.

Согласно теории Дж. Ми [3] на достаточно больших расстояниях от частицы ($r \gg \lambda$) в дальней волновой зоне рассеянное излучение представляет собой поперечную электромагнитную волну. Радиальными компонентами векторов напряженности электрического и магнитного поля можно пренебречь.

Дж. Ми подробно рассмотрел и получил строгое решение для дифракции плоской монохроматической волны на однородной проводящей сфере произвольного диаметра и состава, используя электромагнитную теорию – уравнения Максвелла для электромагнитного поля и соответствующие граничные условия для сферической проводящей поверхности. Амплитуда и интенсивность I рассеянной волны зависят от угла рассеяния: $I=I(\theta)$ и имеют максимум в направлении падения электромагнитной волны при $\theta=0$ (рис.2). Вид индикатрисы рассеяния (полярной диаграммы), которая приведена на рис.2, существенно зависит от размеров, а также от относительного показателя преломления и проводимости частицы. Если диаметр частицы очень велик по сравнению с длиной волны $D \gg \lambda$, то, как следует из приближения геометрической оптики, большая часть падающего света будет отражаться, и индикатриса существенно изменится.

В дальнейшем, поскольку при движении частицы в зондируемой зоне угол рассеяния θ для заданного положения фотоприемника P изменяется незначительно, предполагается, что интенсивность рассеянного излучения зависит только от положения частицы относительно центральной оси (рис.3) гауссовых зондирующих пучков. Из условий

симметрии расположение приемника дифрагированного излучения должно отвечать условию: $\theta_1 = \theta_2 = \alpha / 2$.

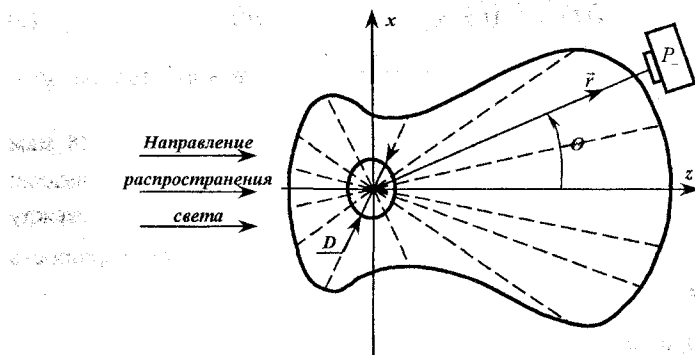


Рис. 2 – Рассеяние световых волн на сферической частице:
 θ – угол рассеяния; $D = 0,2$ мкм – диаметр частицы

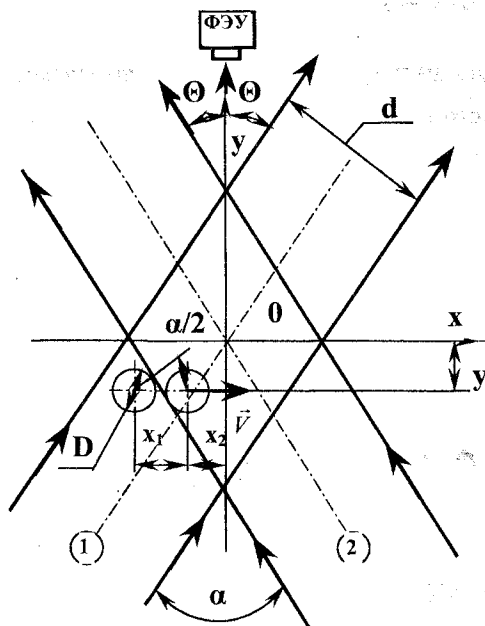


Рис. 3 – Образование зондируемой зоны для получения доплеровского сигнала:
 $\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta = \alpha / 2$ – угол рассеивания; α – угол между двумя зондирующими когерентными пучками; d – диаметр лазерных пучков.

Интенсивность доплеровского сигнала в первом приближении следующим образом зависит от времени (рис.4):

$$I(t) = I_1(t) \cdot \sin(2\pi\nu_D t + \varphi), \quad (5)$$

где $\nu_D = \frac{1}{T_D} = \frac{2 \cdot V \cdot n}{\lambda} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$ – частота доплеровского сигнала; φ – начальная фаза; T_D – период доплеровского сигнала; $\lambda=0,6328$ мкм – длина волны когерентного излучения гелий-неонового лазера; $n=1,33$ – показатель преломления водного раствора; α – угол между двумя зондирующими пучками; \vec{V}_2 – электрофоретическая скорость движения частицы примеси, м/с.

$$I_1(t) = \begin{cases} at & \text{при } 0 \leq t \leq t_1 = \frac{D}{V \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}; \\ 1 & \text{при } t_1 < t \leq t_3 = \frac{(D+d) + (d-D)j}{2V \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}, \end{cases} \quad a = \frac{V \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{D} = \frac{1}{t_1}; \quad (6)$$

t_1 – длительность амплитуды нарастания доплеровского сигнала; d – диаметр гауссового лазерного пучка; $t_3 = \tau/2$ – половина длительности доплеровского сигнала; $j=0 \dots 1$ – параметр, который определяет положение частицы относительно горизонтальной оси симметрии зондируемой зоны (рис.3).

Поскольку форма доплеровского сигнала симметрична, формула (5) определяет величину сигнала для первой половины его длительности τ (рис.4).

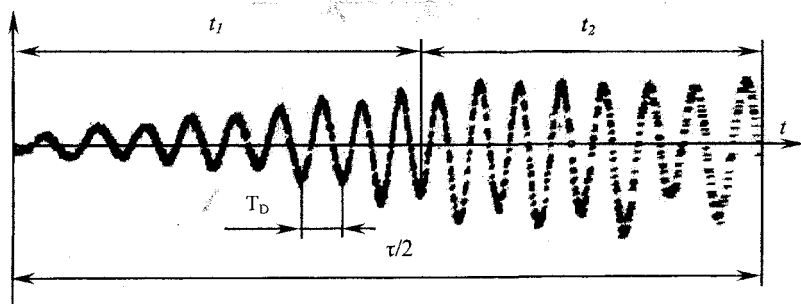


Рис. 4 – Вид доплеровского сигнала (фотография с экрана осциллографа С 9 - 8): $T_D=13$ мс – частота доплеровского сигнала; $t_1=135$ мс – время нарастания амплитуды доплеровского сигнала.

Параметр $J=0...1$ определяет положение движущейся частицы относительно горизонтальной оси симметрии (рис.3):

$$y = \frac{d - D}{2 \sin(\alpha/2)} J. \quad (7)$$

Разработанный алгоритм и программа Speed.01 моделирования формы доплеровского сигнала с выхода ФЭУ лазерного интерферометра позволяют автоматизировать процесс измерения и выбрать оптимальные параметры оптической схемы. Первая половина длительности доплеровского сигнала разбивается на k дискретных интервалов и

для каждого значения $t_i = \frac{t_3}{k} i$ ($i=0,1,...,k$) вычисляется величина сигнала

$I_i = I(t_i)$. Разработанная программа позволяет получить форму сигнала $I(t)$ для различных параметров установки: d, α, φ, E и параметров частицы: D, ξ . Вид сигнала, задаваемые параметры, характеристики движения частицы (V, y) и доплеровского сигнала: ($v_D, T_D, t_1, t_2, t_3, \tau_{max}$), а также относительные погрешности вычислений выводятся на экран монитора и печать (рис.5).

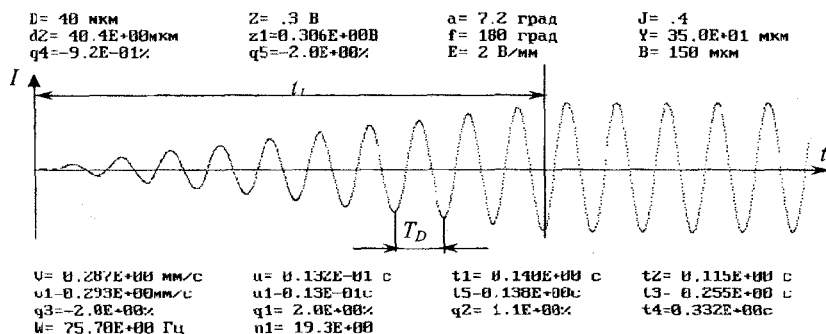


Рис. 5 – Вид доплеровского сигнала, полученного в результате теоретического расчета на ПЭВМ: $D = 40$ мкм; $\xi = 0,3$ В; $\alpha = 7,2^\circ$; $d = 150$ мкм; $V = 0,287$ мм/с.

Время нарастания амплитуды доплеровского сигнала t_1 определяется движением частицы в граничной зоне, когда поверхность частицы освещена одним из зондирующих пучков не полностью:

$$t_1 = \frac{x_1}{V} = \frac{D}{V \cdot \cos \alpha/2}. \quad (8)$$

Время максимального значения амплитуды доплеровского сигнала определяется движением частицы в зондируемой зоне и зависит от положения частицы $y = j \cdot y_{\max}$ относительно горизонтальной оси симметрии:

$$t_2 = \frac{d-D}{2 \cdot V \cdot \cos \alpha/2} \cdot (1-J). \quad (9)$$

Тогда длительность доплеровского сигнала равна:

$$\tau = 2 \cdot t_3 = 2 \cdot (t_1 + t_2). \quad (10)$$

Детальный анализ зависимости формы доплеровского сигнала от параметров измерительной установки позволяет выбрать оптимальные значения угла α между двумя зондирующими пучками и диаметра d пучков, а также разработать алгоритм решения обратной задачи: по виду доплеровского сигнала определить скорость и диаметр движущихся частиц примесей. Для определения скорости V движения частицы необходимо измерить период T_D доплеровского сигнала, тогда:

$$V = \frac{\lambda \cdot v_D}{2 \cdot n \cdot \sin \alpha/2} = \frac{\lambda}{2 \cdot T_D \cdot n \cdot \sin \alpha/2}. \quad (11)$$

Зная электрофоретическую скорость, можно определить электрокинетический дзета-потенциал частицы, используя формулу Смолуховского:

$$\xi = \frac{3 \cdot \eta \cdot V}{2 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot E}. \quad (12)$$

Для определения диаметра частицы необходимо определить время t_1 нарастания интенсивности доплеровского сигнала, тогда:

$$D = t_1 \cdot V \cdot \cos \alpha/2. \quad (13)$$

Программа математического моделирования процесса измерения методом лазерной доплеровской интерферометрии позволяет оценить относительные погрешности определения параметров частиц примесей. Максимально допустимая погрешность алгоритма решения обратной задачи для определения диаметра частицы выбирается равной 6%. Тогда минимальный диаметр частицы при следующих выбранных параметрах установки $d=0,1\text{мм}$, $\alpha=8^\circ$ и $E=2\text{ В/мм}$ равен $D_{\min}=7,5\text{ мкм}$. Минимальное значение дзета-потенциала при этих же параметрах измерительной установки и допустимой относительной погрешности

измерений в случае, когда минимально допустимая частота доплеровского сигнала $\nu_{D,\min}=1$ Гц и напряженность электрического поля $E=10$ В/мм, будет равно $\xi_{\min}=0,8$ мВ.

Таким образом, в результате компьютерного моделирования процесса измерения гидромеханических параметров частиц примесей были выбраны параметры измерительной установки, разработан алгоритм автоматизации измерений и определены границы чувствительности метода лазерной доплеровской интерферометрии. Использование аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифровых методов анализа доплеровского сигнала позволяют автоматизировать процесс измерений и повысить точность определения скорости и эффективного диаметра частиц примесей. Результаты измерений дзета-потенциала и размеров хромсодержащих частиц использовались при оценке эффективности процесса коагуляции при реагентном способе очистки сточных вод гальванического производства.

1. Лобачев П.В., Кривов М.Н. Приборы для определения электрофоретической подвижности частиц в дисперсных системах // Водоснабжение и санитарная техника. – 1979. – № 9. – С. 4–6.

2. Гороновский И.Т. Физико-химическое обоснование автоматизации технологических процессов обработки воды. – К.: Наук. думка, 1975. – 215 с.

3. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. – К.: Вища школа, 1988. – 308 с.

4. Бунин Н.И., Морозов Н.В., Солодов В.В. Лазерный доплеровский интерферометр для контроля размеров, скорости и дзета-потенциала частиц примесей в сточных водах // Тезисы докладов на всесоюз. науч.-техн. конф. "Современные технические средства и методы контроля при охране окружающей среды". – Пенза, 1992. – С. 16–18.

5. А. с. № 1804608 СССР, МКИ С 01 N 15/02. Способ определения скорости и размеров частиц в движущейся среде / Н.И. Бунин, Н.В. Морозов, В.В. Солодов. – № 4946914; Заявл. 17. 06. 91; Опубл. 23. 03. 93; Бюл. № 11.

6. Патент № 45077 А, Украина МПК⁷ G 01 N 15/25. Спосіб вимірювання швидкості, дзета-потенціалу і розмірів частинок / М.І. Бунін, М.В. Морозов, В.В. Морозов, С.І. Мовчан. – № 2001042911; Заявл. 27. 04. 2002; Друк. 15. 03. 2002; Бюл. № 3.

7. Морозов М.В., Мовчан С.І. Визначення параметрів частинок сумішок в процесах електрофореза і седиментації методами лазерної інтерферометрії // Науковий вісник будівництва. Вип. 15. – Харків: ХДТУБА – ХОТБ, 2001. – С. 166–170.

8. Мовчан С.І. Вимірювання швидкості, діаметра і дзета-потенціалу частинок домішок у рідині методом доплерівської інтерферометрії // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 38. – К.: Техніка, 2002. – С. 136–139.

9. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1975. – 512 с.

Получено 24.09.2002